

Yarı-rijit kiriş-kolon birleşimli ince levhalı bir çelik perdenin tersinir yükler altında davranışı

Cüneyt VATANSEVER*, Nesrin YARDIMCI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

İnce levhalı çelik perdeler, büyük başlangıç rijitliğine ve yüksek süneklik ile birlikte büyük enerji sönümleme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle oldukça etkili yatay yük taşıyıcı sistemlerdir. Çok katlı, levhalı bir çelik perde, ince çelik levhalar ile bu levhaların bağlandığı kolon ve kiriş elemanlardan oluşmaktadır. Bu araştırma kapsamında, yarı-rijit kiriş-kolon birleşimleri içeren ince levhalı çelik perdelerin tersinir yükler altında davranışlarını anlayabilmek amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deney numunesi olarak 1/3 ölçekli, tek katlı ve tek açıklıklı çelik perde kullanılmaktadır. Kolon eksenleri arasındaki mesafe 1800 mm, kiriş eksenleri arasındaki yükseklik ise 1200mm'dir. İnce levha kalınlığı 0.50 mm olarak belirlenmiştir. Deney, tersinir yükleme altında ATC-24 esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Numunenin deney sırasında sergilediği davranışı tanımlayabilmek amacıyla 53 adet şekil değiştirme ölçer ile 12 adet yer değiştirme ölçerden yararlanılmaktadır. Deney sonucunda sisteme ait, başlangıç rijitliği, akma dayanımı ve akma yer değiştirmesi gibi karakteristik bilgiler ile yük-yer değiştirme eğrisi elde edilerek ince levhalı çelik perdenin çevrimsel davranışı değerlendirilmiştir. Ayrıca sistemin davranışını anlayabilmek amacıyla, deney sırasında belirli yer değiştirme seviyelerinde ayrıntılı olarak yapılan tespit ve gözlemler de sunulmuştur. Ayrıntılı tespit ve gözlemler ile deney sonuçlarının değerlendirmesi sonunda, göçmenin ince levhanın üst kenarının birleşim kesiti boyunca yırtılması sonucu meydana gelmesine rağmen, levhanın sistemin enerji sönümleme kapasitesine büyük oranda katkıda bulunduğu görülmüştür. Böylece ince levhalı çelik perdenin alternatif bir yatay yük taşıyıcı sistem olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnce levhalı çelik perde, tersinir yükleme, yarı-rijit kiriş-kolon birleşimi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Cüneyt VATANSEVER. cuneyt.vatansever@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 38 00.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Cyclic behavior of thin steel plate shear walls with semi-rigid beam-to-column connections" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.02.2008 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 15.02.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.01.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The behavior of a thin steel plate shear wall with semi-rigid beam-to-column connections under cyclic loads

Extended abstract

Thin steel plate shear walls are very effective and economical lateral load-resisting systems.

A thin steel plate shear wall is composed of vertical steel plates which are named as infill panels and columns and beams connected to steel panels. The beam-to-column connections may be either full moment-resisting and partially moment-resisting (semi-rigid) joint types or simple joint type. Infill steel panels are generally attached to the surrounding frames by either fillet welds or bolts.

Utilization of steel plate shear walls began in early 1970's. Initially, stiffened steel shear walls were used in Japan in new construction and in the USA for seismic retrofit of the existing buildings as well as in new buildings. Early steel shear walls have been designed such that shear buckling of the infill plate should not be occurred. Thus, in order to prevent the shear buckling of the steel panels vertical and horizontal stiffener members attached to the surfaces of the steel infills were used. In that design philosophy, post-buckling behavior of the steel panel was neglected.

In this study, an experimental research which includes one, 1/3 scale, one-storey, single bay test specimen, so-called SW-A-H is performed under cyclic loading in order to understand the cyclic response of thin steel plate shear wall systems.

The test specimen used for this purpose consists of a boundary frame and thin steel plate which is connected to boundary frame members on all edges. Infill plate is 0.50mm thick and has a height of 900mm and width of 1520mm. Self drilling screws with 5.5mm diameter are utilized to provide the connection between the infill and surrounding frame members. Also, a fish plate welded to the flange of each frame member is used.

In this experimental study, the specimen is tested in accordance with the ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, by Applied Technology Council. In accordance with ATC-24, the number of cycles with a peak deformation less than yield displacement were eighteen. The number of cycles with peak deformation that is equal

to yield displacement are three. After the cycles with peak deformation larger than yield displacement, the increment of yield displacement was applied to the peak displacement for each step.

In order to determine the material properties of the infill panel and beam end plates tension coupon tests were conducted at Construction Materials Laboratory of ITU. The coupons were cut in two orthogonal directions from the infill plate. While six coupons were used for the infill panels three coupons were taken for the beam end plates. Cyclic test of the specimen was performed at Structural and Earthquake Engineering Laboratory of ITU. A loading system with an actuator which is capable of producing 250kN and having a stroke with the capacity of ± 300 mm is utilized.

After the experimental observations during testing of the specimen are described, the data from the measurement devices such as strains, displacements and loads are evaluated to generate the information about the behavior of the specimen and response of the infill plate. Therefore, several properties of systems are extracted from the experimental data, namely, initial stiffness, yield base shear and displacement, cumulative energy dissipation and displacement ductility. Furthermore, the orientation and the magnitude of the principal stresses and strains in the infill plate during linear and nonlinear portions are examined and the variation of the strain magnitude and energy dissipation across the infill is investigated. The results obtained from the tests of the specimen, load-deflection curve and envelope curves of the hysteresis, are also presented.

The use of thin steel plate shear wall to resist seismic forces is possible. The experimental results are shown that the entire infill panel of the shear wall specimen SW-A-H participated in dissipating energy. The specimen utilizing flat infill panels and screwed connections to the surrounding frame is found to be reasonably ductile and failure is the result of fractures (tears) in the net sections. Despite these fractures in the net sections, which appeared first at $-5\delta_y$, in the specimen SW-A-H the specimen did not suffer a significant loss of strength until 6 times the yield displacement. But, at the displacement level of $7\delta_y$, the shear force of SW-A-H was suddenly dropped by 34%.

Keywords: *Thin steel plate shear wall, cyclic loading, semi-rigid beam-to-column joint.*

Giriş

İnce levhalı çelik perdeler, büyük başlangıç rijitliğine ve yüksek süneklikle birlikte büyük enerji sönmeme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle oldukça etkili yatay yük taşıyıcı sistemlerdir (Vatansever ve Yardımcı, 2007). Çelik levhalı perdelerle ilgili 1970'li yıllardan başlayarak günümüze kadar gerek kuramsal gerekse deneysel pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların pek çoğu, Japonya, ABD ve Kanada'da yürütülen araştırmalardır. İnce Levhalı Çelik Perdelerin (İLÇP) yatay yük altında davranışlarının tanımlanabilmesi amacıyla yürütülen pek çok çalışmanın temelinde özellikle Thorburn ve Kulak (1983) ile Timler ve Kulak (1983) tarafından gerçekleştirilen deneysel ve kuramsal araştırmalar yer almaktadır (Vatansever ve Yardımcı, 2007).

İLÇP'lerin doğrusal olmayan ve özellikle ince levhaların burkulma sonrası davranışlarının tam olarak tanımlanamadığı dönemlerde, levhalı çelik perdelerin tasarımı, elastik yöntemler kullanılarak çelik levhaların etkiyen yükler altında meydana gelecek iç kuvvetleri burkulma oluşmadan güvenli bir şekilde aktarabilmesi amaçlanarak gerçekleştirilmekteydi. Wagner (1931), bu tip yapıların yük taşıma kapasitelerinin elastik burkulmaya karşı gelen sınır değerden daha büyük olduğunu ve burkulma sonrası taşıma kapasitesinin bu sınır değere göre çok daha yüksek olabileceğini göstermiştir. Bu çalışma esas alındığında, bir İLÇP'ye ait levha, etkiyen yatay yükler altında, çok küçük bir yük seviyesinde elastik olarak burkulmasına rağmen bu noktadan sonra oluşmaya başlayan etkin çekme bölgeleri sayesinde yük taşımaya devam edecektir. İlk olarak Basler (1961), levhalardan teşkil edilen yapma kirişlerde dayanımı, elastik burkulmaya karşı gelen dayanım ile burkulma sonrası dayanımın toplamı şeklinde tanımlayarak levhalı çelik perdelerin tasarımının temel felsefesini oluşturmuştur.

Takahashi ve diğerleri, (1973) rijit betonarme perdelerle alternatif bir taşıyıcı sistem oluşturmak ve rijitleştirilmiş ince levhalı çelik perdelerin davranışlarını araştırmak amacıyla bir seri deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Caccese ve diğ. (1993), kiriş-kolon birleşim tipinin ve

ince levha narinliğinin sistem davranışına etkisini araştırdıkları ¼ ölçekli numunelerin kullanıldığı bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Elgaaly ve diğ. (1993)'de levhalı çelik perdelerin yük-yer değiştirme eğrisini bir başka deyişle, sisteme ait akma dayanımı ve akma yer değiştirmesi ile yatay yük taşıma kapasitesini tahmin edebilmek amacıyla deneysel verilerle destekli analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Benzer deneysel ve kuramsal çalışmalar Driver ve diğerleri (1998), Timler ve diğerleri (1998), Lubell ve diğerleri (2000), Bruneau ve Bhagwagar (2002), Berman ve Bruneau (2005) ve Sabouri-Ghomi ve diğerleri (2005) tarafından da yürütülmüştür.

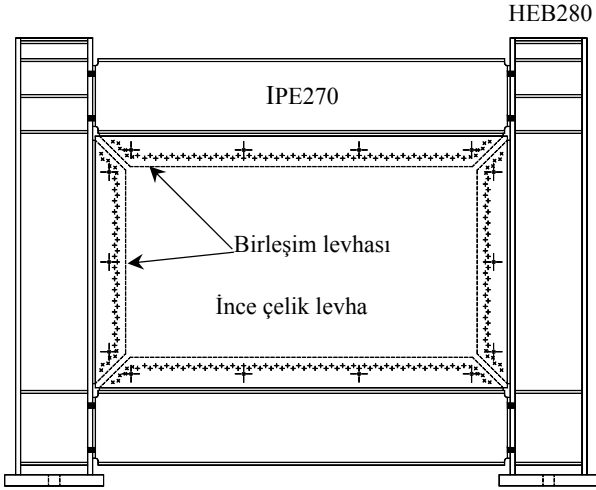
İLÇP'de moment aktaran çelik çerçevelerin kullanılması, özellikle tersinir yük-yer değiştirme döngülerinin daralma miktarını azaltarak sistemin enerji sönmeme kapasitesini arttırmaktadır. Pek çok çalışmada bu durum da gözönüne alınarak kiriş-kolon bağlantıları tam dayanımlı moment aktaran birleşimler olarak tasarlanmıştır. Çelik taşıyıcı sistemlerde yarı-rijit ve kısmi dayanımlı kiriş-kolon birleşimlerinin de varlığı gözönüne alınırca bu tip birleşimlerin ince levhalı çelik perdelerin davranışları üzerine etkisi de gerek deneysel gerekse analitik olarak araştırılmalıdır. Sabouri-Ghomi ve diğerleri (2005) bu etkiyi, plastik mafsalların kolon uçlarında meydana gelmesi durumunda oluşan kat mekanizmasını esas alarak geliştirdikleri analitik metotta, bazı katsayılar kullanarak gözönüne almaktadırlar.

Bu çalışmada, ATC-24 (ATC-24,1992) esas alınarak tersinir yükler altında test edilen kısmi dayanımlı yarı-rijit kiriş-kolon bağlantıları ile teşkil edilen tek katlı ve tek açıklıklı İLÇP'ye ait deneysel gözlemler ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Ayrıca sistem davranışına ait karakteristik değişkenler (akma dayanımı ve akma yer değiştirmesi, yatay yük taşıma kapasitesi) deneysel sonuçlar kapsamında değerlendirilerek özetlenmiştir.

Deney numunesi

SW-A-H olarak adlandırılan İLÇP numunesi (Şekil 1) 1/3 ölçekli tek katlı ve açıklıklı olup, iki adet kiriş ve kolon ile 0.50 mm kalınlıklı çel-

lik levhadan oluşmaktadır. Numunenin kolon eksenleri arasındaki mesafe 1800mm, kiriş eksenleri arasındaki yükseklik de 1200mm'dir. Kiriş-kolon bağlantıları kısa uç levhali bulonlu yarı-rijit birleşimler olarak Eurocode 3 esasları uyarınca tasarlanmıştır. İnce levhanın çelik çerçeveye bağlantısı 5.5mm çaplı matkap uçlu vidalar yardımıyla sağlanmaktadır.



Şekil 1. Deney numunesi SW-A-H

İLÇP için ölçeğin belirlenmesinde, ince çelik levha kalınlığı ile kiriş-kolon birleşimi tasarımında, laboratuvar olanakları ve yükleme sistemi kapasitesi (250kN) belirleyici rol oynayan faktörlerdir. İLÇP'nin tasarımında kiriş ve kolonların en büyük yük seviyesinde elastik kalması amaçlanmıştır. Böylece büyük yük düzeylerinde sistem kapasitesinin, ince levhanın tamamen akması ve kiriş-kolon birleşim bölgelelerinde büyük şekil değiştirmelerin oluşması ile sınırlandırılması esas alınmıştır. Bu amaçla, levha-çerçeve birleşimi, olası net kesit yırtılmasının levhadaki asal gerilmelerin tamamen akma değerine ulaşmasından sonra gerçekleşmesi öngörülerek tasarlanmıştır.

Malzeme deneyleri

İnce çelik levha ve kiriş-kolon birleşim levhasına ait malzeme akma ve en büyük çekme gerilmesi ile elastisite modülü gibi malzeme karakteristik değerlerinin belirlenmesi amacıyla bir seri çekme deneyi yürütülmüştür. Çekme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Malzeme Laboratuvarı olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deney için ince çelik levhadan numuneler, birbirine dik doğrultuda laser kesim yardımıyla TS 138 EN 10002-1'de verilen esaslara uygun olarak alınmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar çelik levha ve kiriş-kolon birleşim levhası olmak üzere sırasıyla Tablo 1 ve 2'de özetlenmektedir.

Tablo 1. İnce çelik levha için çekme deneyi sonuçları

Numune adı	Elastisite modülü [MPa]	Akma gerilmesi [MPa]	En büyük çekme gerilmesi [MPa]
PV1	209121	186.3	304.2
PV2	194623	180.2	311.4
PV3	194939	191.0	318.3
PH1	189961	183.2	317.9
PH2	202567	194.5	332.2
PH3	194623	190.7	319.2
Ortalama	197639	187.7	317.2
St. sapma	6936.22	5.38	9.31
Vry. kats.	3.5	2.9	2.9

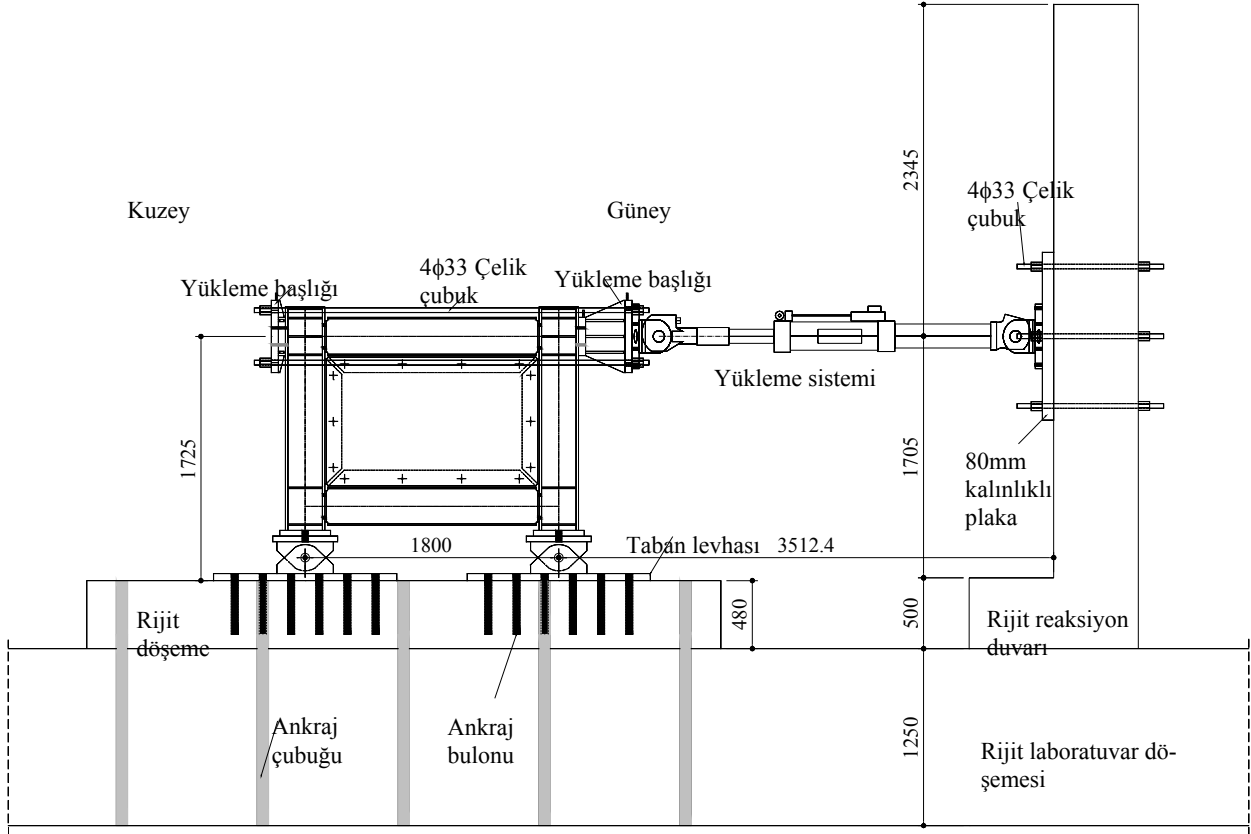
Tablo 2. Kiriş-kolon birleşim levhası için çekme deneyi sonuçları

Numune adı	Elastisite modülü [MPa]	Akma gerilmesi [MPa]	En büyük çekme gerilmesi [MPa]
BEP1	188208	301.1	425.9
BEP2	210825	301.7	421.6
BEP3	179019	302.3	423.7
Ortalama	192684	301.7	423.7
St. sapma	16368.61	0.60	2.15
Vry. kats.	8.5	0.2	0.5

Tasarımda yukarıdaki tablolarda verilen ortalama değerler kullanılmıştır.

Deney düzeneği

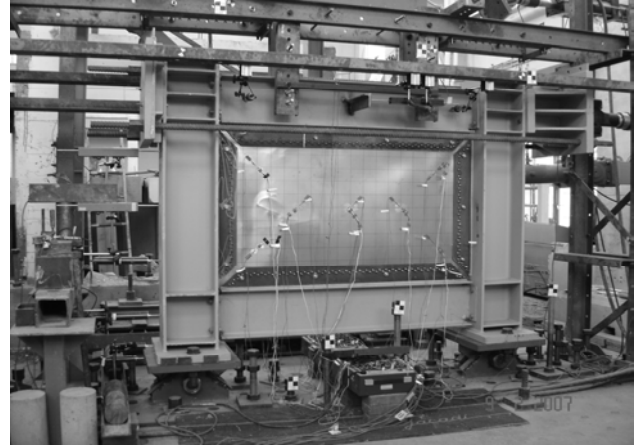
Yer değiştirme kontrollü tersinir yükleme altında gerçekleştirilen deneysel çalışma (İTÜ) Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı olanakları kullanılarak yürütülmüştür. Deneyde 250kN yük ve ± 300 mm yer değiştirme uygulama kapasitelerine sahip yükleme sistemi kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait şematik gösterim Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (ölçüler "mm" dir)

Numune yerleşimi

İLÇP deney numunesi kolon alt uçlarından mafsallı mesnetlere, her bir kolon için iki adet 40.7mm çaplı ve 10.9 malzeme kalitesine sahip bulonlar aracılığıyla birleşmektedir. Kolon taban levhalarının bağlandığı mafsallı mesnet elemanları, serbestçe dönmeyi sağlayan 61.7 mm çaplı Fe52 malzeme kalitesinde çelik çubuklar yardımıyla, rijit betonarme döşemeye mesnetlenen 50mm kalınlıklı taban plakalarına bağlanmaktadır. Bu taban plakalarının döşemeye bağlantısında, her bir plaka için dokuz adet 33mm çaplı ankraj bulonu kullanılmıştır (Şekil 3). Rijit betonarme döşeme, 1250mm kalınlıklı mevcut laboratuvar döşemesine ön gerilmeli ankraj bulonları vasıtasıyla bağlanmaktadır. Üst kiriş ağırlık merkezi hizasından tersinir olarak etkileyecek yükün, itme ve çekme sırasında, kolon üst uçlarından ayrı ayrı olmak üzere etkilebilmesi amacıyla tasarlanan yükleme başlıkları, birbirlerine dört adet 33mm çaplı çelik çubuk kullanılarak bağlanmıştır.



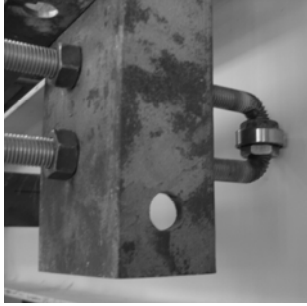
Şekil 3. Numune yerleşimi

Düzlem dışı yer değiştirmenin önlenmesi

Yükleme sırasında numunenin düzlem dışı yer değiştirme miktarını sınırlandırmak amacıyla, İLÇP'nin üst kirişi yatay doğrultuda iki noktadan yardımcı bir çerçeve sistemi aracılığıyla çelik bilyeler kullanılarak sınırlandırılmaktadır (Şekil 4).



(a)



(b)

Şekil 4. Yardımcı çerçeve (a) ve çelik bilyeli kayıcı mesnet (b)

Ölçüm araçları ve düzeni

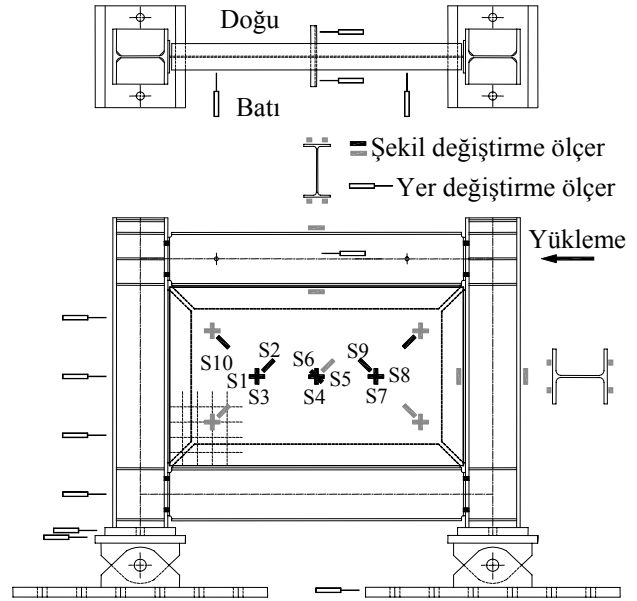
Deneyde yer değiştirme ve şekil değiştirme ölçer olmak üzere iki tip ölçüm aracı kullanılmıştır. Toplam 23 adet tek eksenli, 12 adet iki eksenli ve 2 adet de üç eksenli şekil değiştirme ölçer, ince levhanın her iki yüzünde aynı noktalara, birer kiriş ve kolonun açıklık ortalarına ve yükleme başlıklarını birbirine bağlayan çelik çubuklardan birinin ortasına yerleştirilmiştir. Yer değiştirme ölçümü için toplam 12 adet yer değiştirme ölçerden yararlanılmıştır. Ölçüm araçları yerleşim düzeni her bir levha yüzü için sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmektedir.

Sonuç olarak, yükleme sistemine ait olan, yük ve yer değiştirme değerlerinin ölçüldüğü 2 kanalla birlikte deney sırasında toplam 67 kanaldan veri toplanmıştır. Tüm veriler yükleme sisteminin de bağlı olduğu özel bir bilgisayar yazılımı ve işletim sistemi kullanılarak kaydedilmiştir.

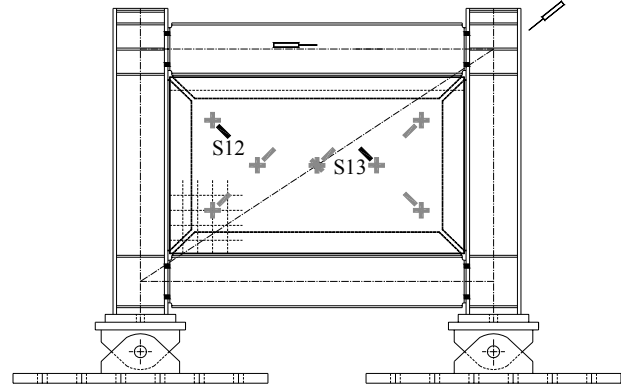
Deney programı ve deneysel gözlemler

Bu bölüm yükleme düzeni ile deneysel tespit ve gözlemlerden oluşmaktadır. Yer değiştirme kontrollü olarak yürütülecek deneye ait yer de-

ğiştirme adımlarının değerleri ve düzeni ile İLÇP'nin deney sırasında sergilediği davranış, yapılan tespit ve gözlemlerin ışığı altında detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 5. Batı yüzeyi şekil ve yer değiştirme ölçer yerleşim düzeni



Şekil 6. Doğu yüzeyi şekil ve yer değiştirme ölçer yerleşim düzeni

Yükleme düzeni ve yer değiştirme adımları

Deney, İLÇP'nin üst kiriş ağırlık merkezi hizasından etkiyen tersinir yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Kolonların üst uçlarından etkiyen herhangi bir normal kuvvet dikkate alınmamıştır. Bu tür sistemlerde kolonlara etkiyen eksenel kuvvetlerin bulunması halinde, İLÇP'nin yatay yük taşıma kapasitesinin %15 oranında azaldığı gözlenmiştir (Elgaaly vd., 1993).

Yer değiştirme adımlarının değerleri ATC-24 esas alınarak belirlenmiştir. ATC-24 uyarınca sistemin, akma dayanımı ve yer değiştirmesinin tahmin edilebilmesi amacıyla İLÇP'nin geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan sonlu eleman modelinin kullanıldığı statik itme analizleri sonunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi kullanılmaktadır. Uygulanan yer değiştirme adımları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Yer değiştirme adımları

Yer değ. adımı	Tekrar sayısı	Bağil yer değ.nin akma yer değ.sine oranı (Δ/δ_v)	Tepe nok. bağil yer değ. [mm]	Tepe nok. topl. yer değ. [mm]
1	3	0.14	0.93	1.13
2	3	0.27	1.82	2.18
3	3	0.40	2.72	3.27
4	3	0.54	3.63	4.42
5	3	0.71	4.84	5.89
6	3	0.87	5.89	7.21
7	3	1	6.77	8.41
8	3	2	12.82	16.79
9	3	3	18.98	25.19
10	2	4	25.28	33.72
11	2	5	31.40	41.97
12	2	6	37.66	50.39
13	1	7	44.00	58.80

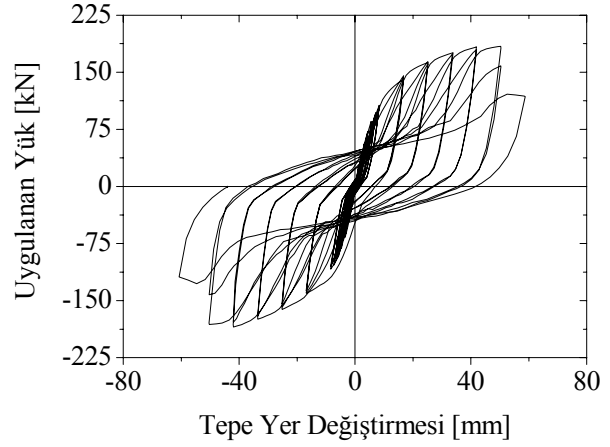
Deneyel gözlemler

Deney numunesi SW-A-H'nin uygulanan tersinir yer değiştirme adımları altında sergilediği yük-yer değiştirme çevrimleri Şekil 7'de verilmektedir. Numune ilk 9 çevrimde elastik bir davranış sergilemiştir. 4., 5. ve 6. çevrimlerde ince levhanın hafif dalgalanarak burkulduğu gözlenmiştir (Şekil 8). Şekil 7'den görüleceği gibi küçük yer değiştirme adımlarında sisteme ait çevrimlerin daraldığı görülmektedir.

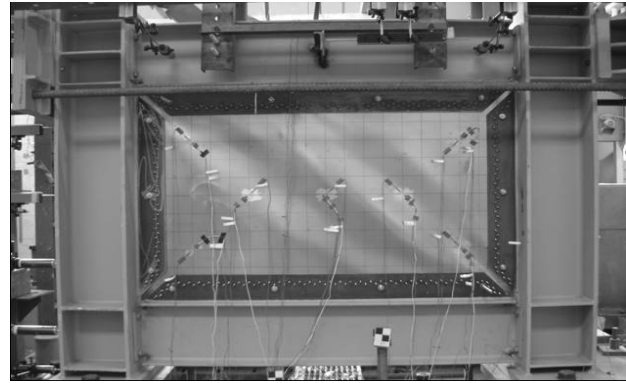
Bu daralmaya, ince levha elemandaki başlangıç kusurlarının, köşe bölgelerde meydana gelen yerel burkulma etkilerinin ve matkap uçlu vidalar çevresinde levha ezilmesinin neden olduğu düşünülmektedir.

19. çevrimin itme bölümünde tepe yer değiştirme değeri 8.41mm, ulaşılan yük değeri de 107kN'dur. Bu noktada gözlenen doğrusal olmayan davranışlar ve yük-yer değiştirme eğrisindeki değişim dikkate alındığında elde edilen

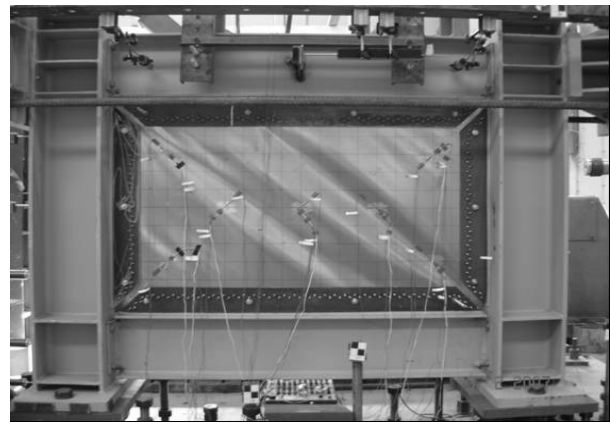
yer değiştirme değeri (8.41mm) numune için akma yer değiştirmesi olarak değerlendirilmiştir. Numunenin bu adımdaki durumu Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 7. Numune SW-A-H'nin çevrimsel davranışı

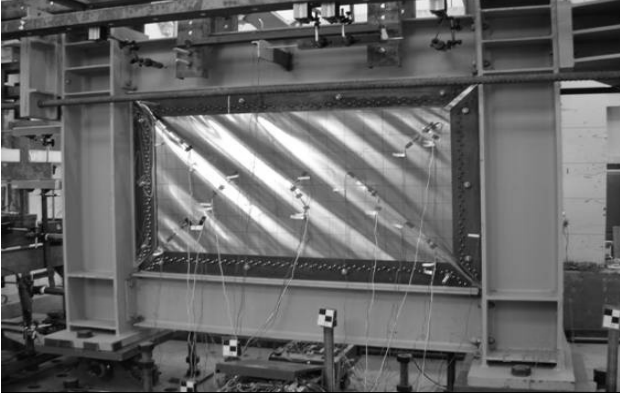


Şekil 8. İnce levhanın burkulması (çevrim:6, tepe yer değ.:+2.18mm)



Şekil 9. İnce levhanın durumu (çevrim:19, tepe yer değ.:+8.41mm)

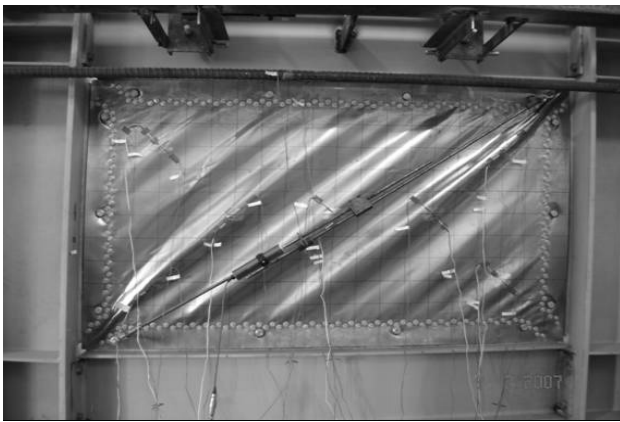
25. çevrimde uygulanan yer değiştirme değeri 25.19mm ($\pm 3\delta_y$)'dir. Şekil 10'da numunenin durumunun verildiği bu adımda, ince levhanın burkulması nedeniyle oluşan dalgaların büyüklüğü ve sayısı artmıştır.



Şekil 10. İnce levhanın durumu (çevrim:25, tepe yer değ.:+25.19mm)

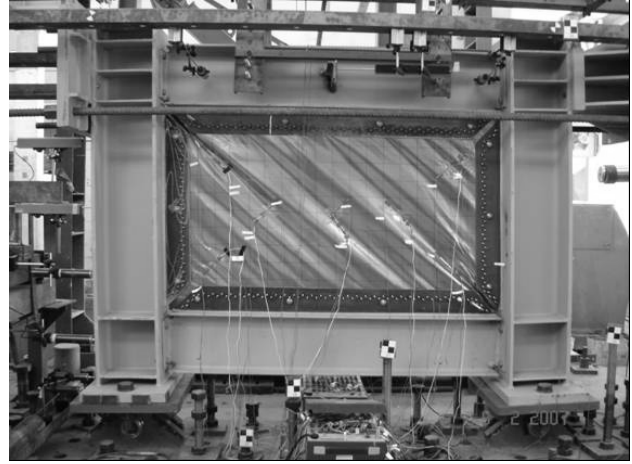
Şekil 10 incelendiğinde oluşan dalgaların doğrultularının yatayla yaptığı açının yaklaşık olarak 45° olduğu görülmektedir. Bu adımda ulaşılan yük değeri 163kN olup, 3 çevrim olarak gerçekleştirilen yükleme adımında herhangi bir yük kaybı gözlenmemiştir.

27. çevrimden sonra ATC-24 uyarınca, tüm yer değiştirme adımlarında çevrim sayısı iki olarak uygulanmıştır. Numune durumu Şekil 11'de verilen 28. çevrime gelindiğinde ince levhada kalıcı şekil değiştirmelerin ve burkulma dalgalarının büyüklüğü ve sayısı artmıştır.



Şekil 11. Numunenin durumu (çevrim:28, tepe yer değ.:+33.72mm)

30. çevrim ($\pm 5\delta_y$) olarak gerçekleştirilen yer değiştirme adımının çekme bölümünde ince levhanın üst kuzey köşesinde yaklaşık 4mm uzunluğunda bir yırtılma gözlenmiştir. Bu yırtılmaya rağmen ulaşılan 183kN'luk yük değerinde herhangi bir ani azalma gözlenmemiştir. Numunenin bu adımdaki şekil değiştirmiş durumu Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. Numunenin durumu (çevrim:30, tepe yer değ.:+41.97mm)

50.39mm'lik tepe yer değiştirme adımının ($\pm 6\delta_y$) uygulandığı 32. çevrimde, matkap uçlu vidaların bulunduğu net kesitte meydana gelen yırtığın uzunluğu yaklaşık 75mm olarak ölçülmüştür (Şekil 13).



Şekil 13. Levha üst kuzey köşesinde yırtılma (çevrim:32, tepe yer değ.:+50.39mm)

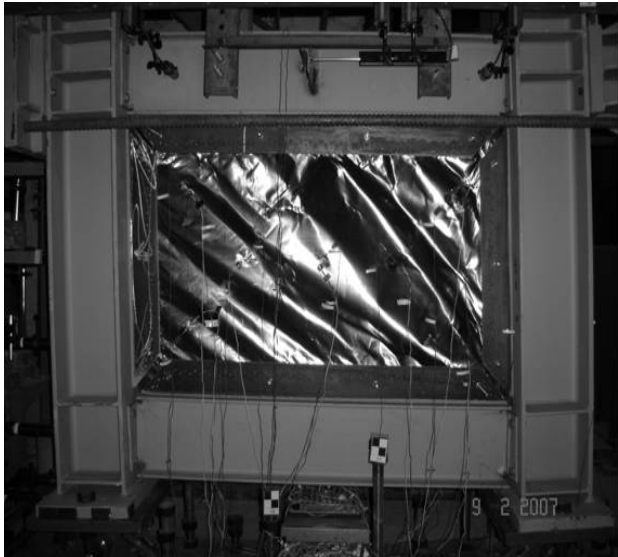
33. çevrimin ilk yarısında net kesitte meydana gelen yırtılma yaklaşık olarak 560mm'ye ulaşmıştır. 32. çevrimde elde edilen en büyük yatay

kuvvet 180kN iken, 33. çevrimin itme aşamasında bu değer 157kN'a düşmüştür. Bu çevrimin çekme aşamasına gelindiğinde net kesitteki yırtılma üst kuzey köşede 640mm (Şekil 14), üst güney köşede ise 320mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 14. Levha üst kuzey köşesinde yırtılma (çevrim:33, tepe yer değ.: -50.39mm)

34. çevrimde uygulanan yer değiştirme değeri 58.80mm ($\pm 7\delta_y$), yük ise 118kN'dur. Bu adımda levha üst kenarının net kesitte meydana gelen yırtılma nedeniyle ayrılması sonucunda bir adet çevrim gerçekleştirilerek yüklemeyi durdurulmuştur. Bu aşamada yük değerinde yaklaşık %34 oranında bir ani azalma gözlenmiştir. Bu son çevrime ait göçme durumu ve yırtılarak ayrılma sırasıyla Şekil 15 ve 16'da gösterilmektedir.



Şekil 15. Numunenin durumu (çevrim:34, tepe yer değ.: +58.80mm)

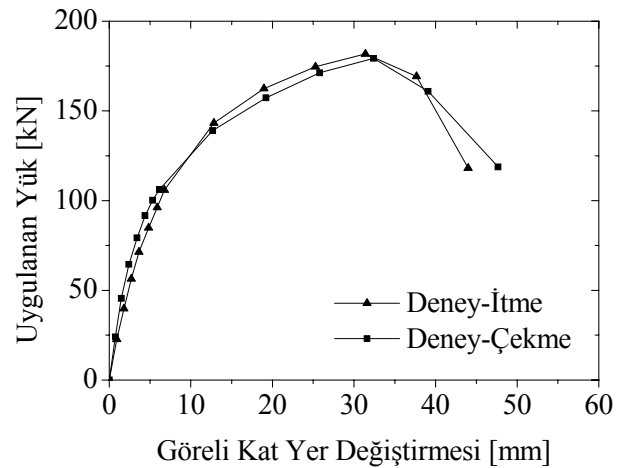


Şekil 16. Levha üst kuzey köşesinde yırtılarak ayrılma (çevrim:34, tepe yer değ.: -58.80mm)

Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Deney sonunda elde edilen yük-yer değiştirme çevrimlerinin itme ve çekme bölümlerine ait zarf eğrileri Şekil 17'de verilmektedir. Bu eğrilerdeki yük ve yer değiştirme değerleri, her bir yüklemeyi adımındaki çevrimlerde ulaşılan yük ve yer değiştirme değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

Şekil 17 incelendiğinde sistemin beklenildiği gibi simetrik bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 17. Numune SW-A-H zarf eğrileri

Belirli yer değiştirme seviyelerinde başlangıç rijitliğinin değişimi, meydana gelen plastik şekil

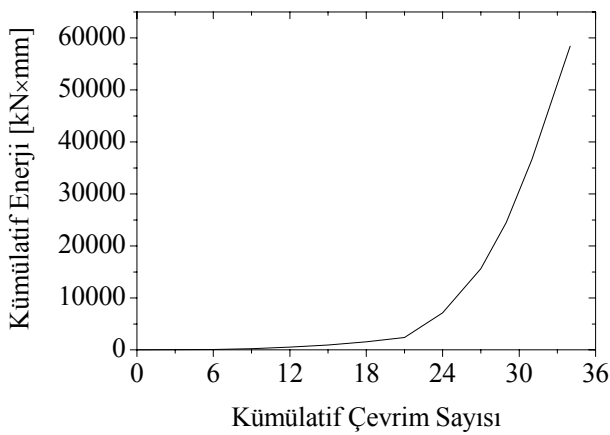
değiştirme, yırtılma ve kırılma sınır durumlarının etkisi konusunda sistem davranışı ile ilgili olarak bilgi vermesi bakımından oldukça önemlidir. Bu amaçla, İLÇP numunenin her bir çevrim için başlangıç rijitliklerindeki değişim Δ/δ_y oranına bağlı olarak Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Sistem başlangıç rijitliğinin değişimi

Çevrim	(Δ/δ_y)	Başlangıç rijitliği [kN/mm]
1	0.14	29.865
4	0.27	22.058
7	0.40	19.788
10	0.54	15.701
13	0.71	11.997
16	0.87	11.316
19	1	9.320
22	2	7.073
25	3	4.010
28	4	3.114
30	5	1.297

Başlangıç rijitliği her bir yer değiştirme adımına ait birinci çevrimlerin ilk yarısının içerdiği belirli sayıda nokta dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hesaplarda ikinci derece polinom eğrisinin gözönüne alındığı regresyon analizinden yararlanılmıştır.

İLÇP numune tarafından sönmölen kümülatif enerji miktarları grafik halinde kümülatif çevrim sayısına bağlı olarak Şekil 18'de verilmektedir.



Şekil 18. Kümülatif enerji sönmöleme miktarı

İnce levha boyunca özellikle asal gerilme ve şekil değiştirme doğrultularının değişimini gözlemek amacıyla, belirli yer değiştirme seviyele-

rine bağlı olarak, şekil değiştirme ölçerlerin bazılarında alınan veriler değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. İnce levha için gerilme ve şekil değiştirme asal doğrultuları

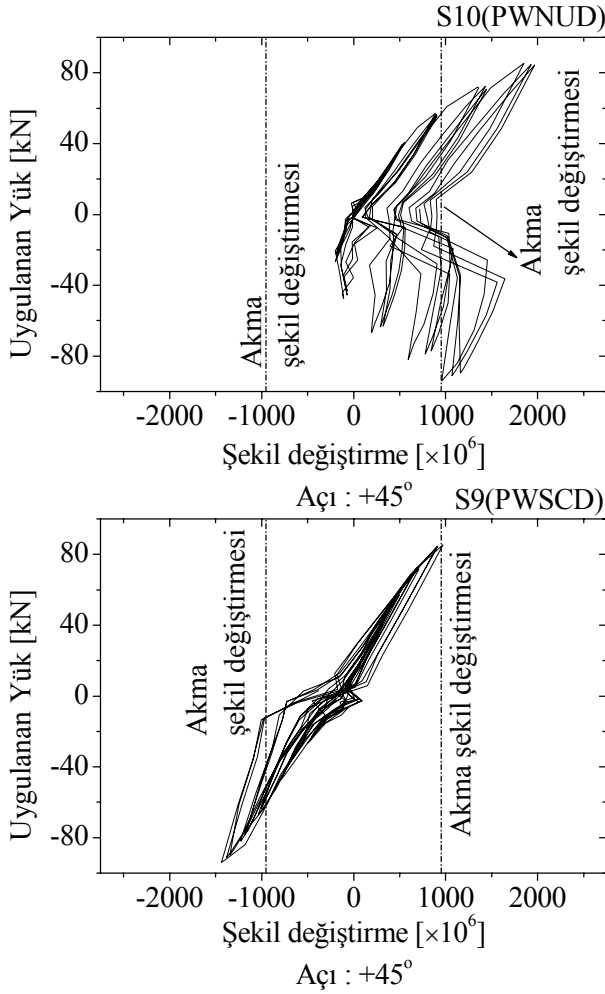
Şekil değiş. ölçer	Gör. kat ötelemesi [%]	α [°]	Asal şekil değiş. [mm/mm]	Asal gerilme [MPa]
	0.08	46	0.000315	63.19
S1(PWNCH)	-0.07	-47	0.000287	41.37
S2(PWNCD)	0.15	45	0.000489	108.26
S3(PWNCV)	-0.13	-47	0.000543	100.70
	0.23	46	0.000710	165.59
	-0.20	-47	0.000815	174.00
	0.08	58	0.000310	64.39
S4(PWCV)	-0.07	-61	0.000319	85.19
S5(PWCH)	0.15	58	0.000486	93.62
S6(PWCD1)	-0.13	-54	0.000560	139.55
	0.23	57	0.000705	138.41
	-0.20	-52	0.000837	202.07
	0.08	44	0.000134	1.21
S7(PWSCV)	-0.07	-45	0.000197	10.74
S8(PWSCH)	0.15	45	0.000317	27.19
S9(PWSCD)	-0.13	-46	0.000561	70.23
	0.23	47	0.000499	53.57
	-0.20	-47	0.001033	156.96

Tablo 5 incelendiğinde ince levhanın orta bölgesinde asal doğrultu açısının 45° 'den farklı kenar bölgelerde ise bu açının 45° dolaylarında olduğu gözlenmektedir. Ancak levha üzerine çizilen karelerden, akmadan sonra oluşan burkulma dalgaları doğrultularının 45° açıyla oluştuğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla deneysel gözlemlere dayanarak çekme bölgeleri doğrultularının 45° açıyla oluştuğu söylenebilir.

Şekil değiştirme değerlerinin ince levha boyunca her iki yüzde de değişimini görmek amacıyla batı yüzeyindeki değişim için S10 (PWNCD) ve S9 (PWSCD) doğu yüzeyindeki değişim için S12 (PESUD) ve S13 (PENCD) olarak adlandırılan şekil değiştirme ölçerler dikkate alınmıştır. Şekil 19 ve 20'de verilen yük-birim şekil değiştirme diyagramlarının değerlendirilmesinde görel kat öteleme değeri 4.84mm ile sınırlandırılmıştır.

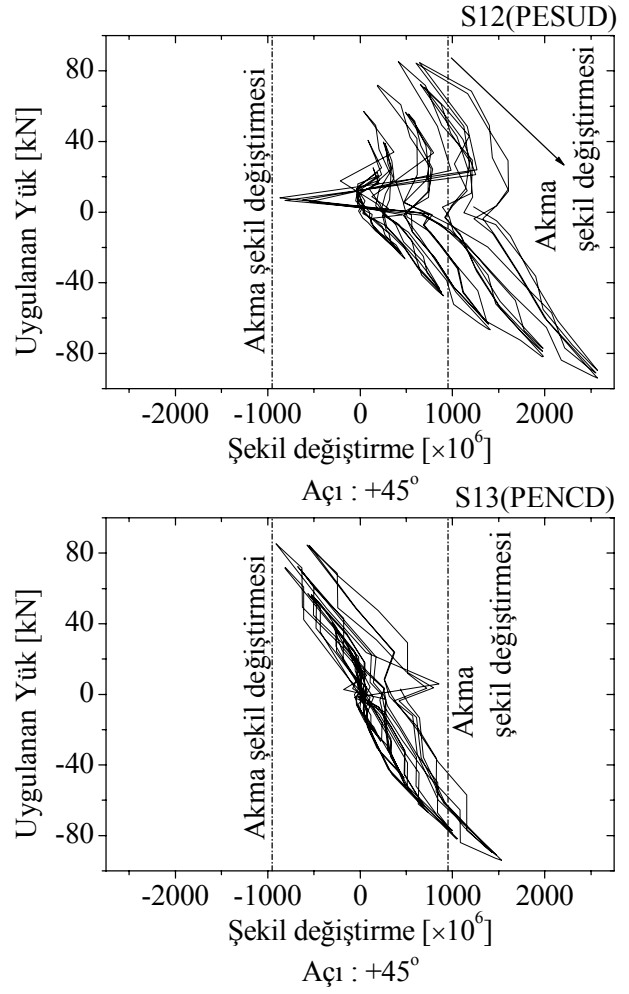
Sonuçlar

Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:



Şekil 19. Şekil değiştirme değerlerinin değişimi

- SW-A-H numunesinin tersinir yükler altında gerçekleştirilen deneyinde yükleme, akma yer değiştirmesi değerinin 6 katı, bir başka deyişle 37.66mm görelî kat ötelemesi (%3.14) değerine kadar devam etmiştir.
- İLÇP numunenin akma dayanımı, 107kN, akma yer değiştirme değeri 8.41mm olarak belirlenmiştir.
- Sistemin yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık 183kN olarak elde edilmiştir.
- Deney sonunda sistemin göçme modu, ince levhadaki gerilmelerin akma gerilmesine ulaşmasından sonra levha üst kenarında, birleşim kesiti boyunca yırtılarak ayrılma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Sönümlenen enerjinin, özellikle akma yer değiştirmesine ulaşılmasından sonra büyük oranda arttığı gözlenmiştir.



Şekil 20. Şekil değiştirme değerlerinin değişimi

Kaynaklar

- ATC-24, (1992). *Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures*, Applied Technology Council, California.
- Basler, K., (1961). Strength of plate girders in shear, *Journal of Structural Division*, **87**, ST7, 2967.
- Berman, J. ve Bruneau, M., (2005). Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls, *Journal of Structural Engineering*, **131**, 2, 259-267.
- Bruneau, M. ve Bhagwagar, T., (2002). Seismic retrofit of flexible steel frames using thin infill panels, *Engineering Structures*, **24**, 443-453.
- Caccese, V., Elgaaly, M. ve Chen, R., (1993). Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, **119**, 2, 0573-0587.
- Driver, R.G., Kulak, G.L. Kennedy, D.J.L. ve Elwi, A.E., (1998). Cyclic test of four-story steel plate

- shear wall, *Journal of Structural Engineering*, **124**, 2, 0112-0120.
- Elgaaly, M., Caccese, V. ve Du, C., (1993). Post-buckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads, *Journal of Structural Engineering*, **119**, 2, 588-605.
- Lubell, A.S., Prion, H.G.L., Ventura, C.E. ve Rezai, M., (2000). Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, **126**, 4, 0453-0460.
- Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E. ve Kharrazi, M.H.K., (2005). Shear analysis and design of ductile steel plate walls, *Journal of Structural Engineering*, **131**, 6, 878-889.
- Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T. ve Takagi, M., (1973). Experimental study on thin steel shear walls and particular bracing under alternative horizontal load, *Proceedings, IABSE Symp. on Resistance and Ultimate Deformability of Structure Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, 185-191, Lisbon.
- Thorburn, L.J. ve Kulak, G.L., (1983). *Analysis of steel plate shear walls*, Structural Engineering Report, University of Alberta, 107, Canada.
- Timler, P., Ventura, C.E., Prion, H. ve Anjam, R., (1998). Experimental and analytical studies of steel plate shear walls as applied to the design of tall buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, **7**, 233-249.
- Timler, P.A. ve Kulak, G.L., (1983). *Experimental study of steel plate shear walls*, Structural Engineering Report, University of Alberta, 114, Canada.
- TS-138 EN 10002-1, (2004). Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at ambient temperature, *Turkish Standards Institute*, Ankara.
- Vatansever, C. ve Yardımcı, N., (2007). İnce levhali bir çelik perdenin artan yatay yük altında analitik olarak incelenmesi, 2. *Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu*, 10-11 Mayıs, Eskişehir.
- Wagner, H., (1931). *Flat sheet metal girders with very thin metal webs, part I-general theories and assumptions*, Technical Report, National Advisory Committee for Aeronautics, 604.